

В.В. Тихоненко, А.М. Шкилько, канд. физ.-мат. наук, Харьков, Украина

ИЗНАШИВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, УПРОЧНЕННОГО МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Исследованы триботехнические характеристики покрытия, полученного методом микродугового оксидирования на алюминиевом сплаве Д16, с привлечением физических методов диагностики.

Досліджено триботехнічні характеристики покриття, отриманого методом микродугового оксидування на алюмінієвому сплаві Д16, із залученням фізичних методів діагностики.

Tribological characteristics of coatings produced by microarc oxidation on aluminum alloy D16 are researched with the involvement of physical methods of diagnosis.

Введение. Детали из алюминиевых сплавов, применяемые в современном оборудовании, обладают повышенной прочностью и хорошей технологичностью изготовления, но имеют низкую твердость и невысокую износостойкость. Одним из наиболее перспективных способов поверхностного упрочнения является метод микродугового оксидирования (МДО), который позволяет получать на деталях из алюминия и его сплавов многофункциональные покрытия с уникальным комплексом свойств и высокими эксплуатационными характеристиками [1]. Технология МДО является гибкой и экологически чистой, она универсальна, поскольку может применяться как при изготовлении, так и при восстановлении деталей машин. Однако, технология МДО не позволяет получать одинаковую износостойкость упрочненных оксидных слоев, т.к. при приближении к поверхностным слоям основного металла их твердость снижается. Неодинаковое распределение твердости способствует различной кинетике изнашивания сопрягаемых деталей при эксплуатации и особенно при их приработке.

Износостойкость деталей машин должна оцениваться в соответствии со свойствами их поверхностных слоев и процессами, протекающими при износе. Изменения в поверхностном слое при эксплуатации характеризуются степенью пластической деформации, процессами диффузии и адсорбции, термическими и усталостными явлениями. В результате этих изменений возможно как упрочнение поверхностного слоя (механическое, термодиффузионное), так и разупрочнение [2].

Согласно ГОСТ 30480-97 исследование поверхностей, подвергнутых износу, предлагается осуществлять методами акустической эмиссии, контактной разности потенциалов (КРП), микротвердости и т.д. Данные методы и были выбраны нами при проведении исследований, но вместо акустической эмиссии выбрана не менее эффективная экзозмиссионная диагностика. На интенсивность и кинетику экзозлектронной эмиссии влияют характеристики материала, из которого изготовлены образец и контртело (химический состав, размер зерен, дефектность структуры, физическо-химическое состояние поверхности), состав атмосферы, окружающей трущуюся пару, а также вид трения [3]. Метод КРП обладает высокой чувствительностью к изменению физико-химических свойств поверхности трения и позволяет контролировать режимы трения, изучать динамику дефектов на трущейся поверхности, выявлять локальные очаги разрушения поверхности трения, изучать взаимодействие смазочных материалов с поверхностью трения. Он может найти широкое применение при подборе материалов и смазок для конкретных узлов трения, т.е. при решении широкого ряда задач практической триботехники [4].

Целью настоящей работы является исследование триботехнических характеристик покрытия, полученного методом микродугового оксидирования на алюминиевом сплаве Д16, с привлечением физических методов диагностики.

Методика эксперимента.

Износостойкость поверхностей образцов с покрытием, полученным микродуговым оксидированием на алюминиевом сплаве Д16, исследовали в динамике трения в условиях сухого трения по схеме «диск-колодка». МДО-покрытие толщиной 150-200 мкм наносилось на диск.

Экспериментальная установка для исследования процессов трения включала три основных узла – измеритель КРП, устройство для измерения фотостимулированной эмиссии заряженных частиц (ФСЭЭ) и узел трения. Устройство для измерения ФСЭЭ представляло собой модифицированный метод измерения фотоэмиссионного тока на воздухе [5]. Узел трения принципиальных отличий от известных не имел. Стимулирование экзозлектронной эмиссии осуществлялось ультрафиолетовым осветителем с набором светофильтров.

До и после эксперимента измерялись микротвердость дорожек трения с помощью ПМТ-3М. Износ покрытий определялся по уменьшению размера

тела в направлении, перпендикулярном к поверхности трения (линейный износ, J), при помощи индикатора часового типа с точностью $\pm 0,001$ мм.

Общий вид устройств для совместного исследования трения, экзосмиссии и КРП представлены на рис. 1.

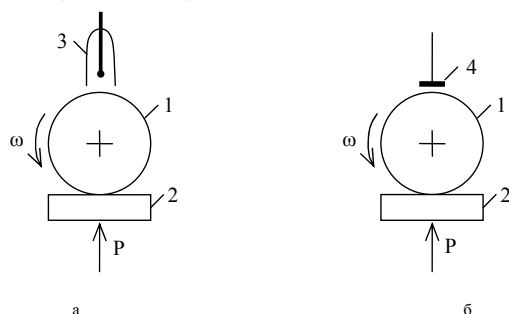


Рисунок 1 – Схемы узлов устройства для регистрации экзосмиссии (а) и КРП (б) в динамике трения: 1 – диск с МДО-покрытием; 2 – контрортел (колодка); 3 – детектор экзосмиссии, 4 – эталонный образец измерителя КРП

Методика измерений экзосмиссии при трении аналогична предложенной в работе [6]. Диск 1 подвергается трению о контрортел 2, а экзосмиссия измеряется детектором 3, находящимся в верхней части кольца. Свободное пространство перед детектором облегчает его монтаж и эксплуатацию, смену заградительных щитков, установку эталона, а также позволяет вести визуальное наблюдение и применять одновременно другие методы исследования. При снятии нагрузки контрортел 2 опускается, трение прекращается в нужный момент, а кольцо продолжает вращаться на холостом ходу, не внося дополнительных погрешностей в экспериментальные результаты. Комплекс аппаратуры, обслуживающей счетчик, с добавлением двухкоординатного самопишущего прибора ПДС-021 позволял непрерывно наблюдать и записывать возникающую в воздушной среде в динамике трения электронную эмиссию.

На рис. 1 (б) вал 1 подвергается трению о контрортел 2, выполненное в виде колодки. КРП измеряется между трущейся поверхностью вращающегося вала 1 и эталонным образцом 4.

293

Результаты исследований и их обсуждение

Сухое трение является наиболее жестким режимом изнашивания пар трения. При этом наиболее четко выявляются свойства материалов, связанные с сопротивлением его изнашиванию, когда происходит непосредственное взаимодействие контактирующих поверхностей. В процессе сухого трения верхний слой металла подвергается интенсивной пластической деформации, развитию дислокационной структуры в приповерхностных слоях металлов и сплавов, интенсивной эмиссии заряженных частиц и изменению КРП.

Механическое воздействие при трении переводит поверхностные слои металла в энергетическое состояние, когда энергии квантов облучения достаточно для возникновения эмиссии электронов. В таком состоянии, как допускают авторы [6], под воздействием энергии облучения возможен процесс последовательного (каскадного) перехода электрона с более низких на более высокие энергетические уровни, который обладает определенным временем развития. Информация, получаемая с помощью методов экзосмиссии заряженных частиц и КРП, позволяет проследить достаточно глубокую связь интенсивности эмиссии экзосмиссии и изменения поверхностного потенциала с различными параметрами, характеризующими дефектность поверхности при трибонагружении.

В результате сравнительной оценки износостойкости оксидных слоев на алюминии Д16 установлено, что у композиционного материала с оксидным покрытием износостойкость выше, чем у материала без покрытия. Измерения микротвердости показали, что характер ее изменения одинаков для каждой марки упрочненного сплава и прослеживается взаимосвязь с интенсивностью изнашивания оксидных слоев, что не противоречит результатам работы [7].

На рис. 2 представлены результаты измерений скорости изнашивания, интенсивности ФСЭ, КРП во времени и распределение микротвердости по толщине МДО-покрытия. По интенсивности изнашивания в покрытии выделяются три зоны, соответствующие трем слоям МДО-покрытия. Рыхлый поверхностный слой характеризуется наибольшей интенсивностью и скоростью изнашивания, поскольку имеет максимальное количество микро- и макродефектов, наибольшую из всех слоев пористость и относительно низкую величину микротвердости. В основном рабочем слое с наивысшей микротвердостью (до 22-25 ГПа) наблюдается наименьшая скорость изнашивания вплоть до переходного слоя, являющегося приграничной зоной перехода между материалом детали и покрытием. Когда опора нагрузки проходит границу раз-

294

дела покрытие-подложка и достигает мягкой, необработанной алюминиевой подложки, происходит резкое увеличение скорости износа.

Авторы работы [8] причинами наивысшей износостойкости МДО-слоев на сплавах типа Д16 считают, во-первых, то, что нитевидные кристаллы α - Al_2O_3 (корунда), содержащиеся в основном слое покрытия и закрученные в клубки совместно с мелкокристаллической матрицей, практически лишены возможности деформационных смещений за счет деформации одной матрицы, а, во-вторых, локализацию очагов разрушения на поверхностях, имеющих ячеистую структуру, поскольку микротрещины, разделяющие отдельные глобулы, задерживают смазку и уменьшают напряжения, передаваемые от деформированной глобулы к соседним.

Таким образом, учитывая вышесказанное и работы [7-10], можно заключить, что МДО-покрытие, по сути, является композиционным материалом, который удачно сочетает в себе относительную пластичность матрицы, состоящей из твердого раствора муллита $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ с незначительным количеством γ - Al_2O_3 и сложнooksидных соединений элементов основы с упрочняющей фазой α - Al_2O_3 , которая, главным образом, и обеспечивает высокую износостойкость покрытий.

Выявлено, что сплав Д16 по сравнению с АМгб и АК5 технологичнее, поскольку имеет повышенную микротвердость упрочненных слоев за счет значительного содержания α -фазы Al_2O_3 , а также, как предполагается в работе [7], вследствие большей плотности и меньшей величины зерна при оксидировании.

В начальной фазе процесса трения наблюдается скалывание микронеровностей. В процессе приработки на поверхности образца возникает большое количество эмиссионно-активных центров, которыми являются обнаженные поверхности срезанных микронеровностей с повышенной плотностью дислокаций [3]. Количество таких центров в процессе приработки увеличивается за счет увеличения реальной площади контакта, в результате чего наблюдается рост ФСЭ в начальной фазе совместной работы образец – контрортел, причем наклон кривой почти постоянен. Интенсивность ФСЭ увеличивается с ростом скорости изнашивания, либо вместе с увеличением давления контрортела на образец или при увеличении угловой скорости образца [3]. За определенный отрезок времени при постоянной нагрузке эмиссия достигает насыщения. Повышенному значению микротвердости основного слоя покрытия соответствует менее интенсивная экзосмиссия. С возрастанием износа до определенной глубины слоя наступает разупрочнение металла, раз-

295

рушение его поверхностного слоя, что приводит к изменению интенсивности и кинетики ЭЭ во времени. Затуханию эмиссии экзосмиссии отвечает аналогичное увеличение микротвердости поверхности трения.

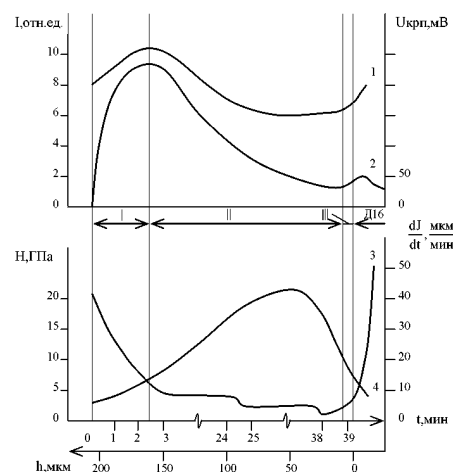


Рисунок 2 – Изменение КРП (1), интенсивности ФСЭ (2), скорости изнашивания (3) во времени и распределение микротвердости (4) по толщине покрытия, нанесенного методом МДО: I – наружный слой, II – основной слой, III – переходной слой.

Изменения КРП характеризуют те процессы, которые проходят в материале пары трения в различные моменты ее работы. В начальный момент работы пары отмечается скачкообразное повышение КРП, что связано с первоначальным этапом в формировании поверхностей трения (разрушение адсорбционных слоев, обнажение ювенильных участков, приработка контактируемых поверхностей), а также особенностью строения МДО-покрытия. При достижении основного слоя наблюдается снижение КРП относительно ее исходной величины, и через некоторое время КРП принимает установившееся значение до достижения материала подложки. В случае максимальных значений КРП поверхность образца имеет наибольшую дефектность, средним уча-

296

сткам подъема КРП соответствует интенсивное образование параллельных поверхности трения трещин, минимальное упрочнение соответствует наибольшим значениям КРП. Выявлена зависимость между коэффициентом трения и КРП пар трения: с увеличением коэффициента трения КРП возрастает.

Отметим, что МДО-покрытия обладают высокими антифрикционными свойствами, однако, наличие рыхлого слоя существенно ухудшает антифрикционные свойства пары трения, в процессе эксплуатации наблюдается осыпание частиц этого слоя покрытий, в зонах трения скапливаются порошкообразные продукты износа, которые существенно повышают коэффициент трения и интенсивность износа. Поэтому при работе МДО-покрытий в парах трения рекомендуется предварительно удалять рыхлый слой механическим путем или предусматривать операцию приработки.

Заключение

На основании проведенных исследований показано, что износостойкость оксидных слоев зависит от физико-химического состояния поверхности, оказывающего влияние на величину коэффициента трения, и микротвердости слоя. Высокая твердость, низкий коэффициент трения, малая пористость и шероховатость получаемых МДО-покрытий позволяет использовать их в качестве износостойких в различных областях промышленности.

Планируется разработка способа контроля многофункциональных МДО-покрытий по совокупности контролируемых характеристик и рабочей методики испытаний износостойких покрытий, полученных микродуговым оксидированием на алюминиевых сплавах.

Список использованных источников: 1. Тихоненко В.В. Метод микродугового оксидирования / В.В. Тихоненко, А.М. Шкилько // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/13 (56). – С. 13-18. 2. Зенкин Н.А. Повышение эксплуатационных характеристик композиционных материалов путем оптимизации упрочняющих технологий: Монография / Зенкин Н.А., Копылов В.И. – Киев, 2002. – 271 с. 3. Хандэль-Повержа З. Экзоэлектронная эмиссия при исследовании трения скольжения стали 45 / З. Хандэль-Повержа, А. Перикала, М. Пируг // Трение и износ. – 1981. – Т. 11, № 1. – С. 22-26. 4. Ибрагимов Х.И. Работа выхода электрона в физико-химических исследованиях / Ибрагимов Х.И., Корольков В.А. – М: Интермет Инжиниринг, 2002. – 526 с. 5. Шкилько А.М. Экзоэмиссионная диагностика поверхности конструкционных материалов: монография / Шкилько А.М. – Харьков: Ноудидж, 2009. – 240 с. 6. Евдокимов В.Д. Экзоэлектронная эмиссия при трении / Евдокимов В.Д., Семенов Ю.И. – М.: Наука, 1973. – 182 с. 7. Федоров В.А. Влияние микродугового оксидирования на износостойкость алюминиевых сплавов / В.А. Федоров, Н.Д. Великосельская // Трение и износ. – 1989. – Т. 10, № 3. – С. 521-524. 8. Особенности микроструктуры упрочненных слоев, получаемых микродуговым оксидированием / В.П. Алехин, В.А. Федоров, С.И. Булычев [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1991. – № 5. – С. 121-126. 9. Кинетика изнашивания покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования / А.А. Петросяц, В.Н. Малышев, В.А. Федоров [и др.] // Трение и износ. – 1984. – Т. 5, № 2. – С. 350-353. 10. Износостойкость покрытий, нанесенных анодно-катодным микродуговым методом / Г.А. Марков, В.И. Белевцев, О.П. Терлеева [и др.] // Трение и износ. – 1988. – Т. 9, № 2. – С. 286-290.

Поступила в редакцию 12.05.2012